



Evaluación de la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga-Atlántico a partir de la aplicación de la metodología DRASTIC.

Jessy Johana Lambis Orobajo

Universidad del Norte
Departamento de física y geociencias
Barranquilla, Colombia
2020

Evaluación de la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga-Atlántico a partir de la aplicación de la metodología DRASTIC.

Jessy Johana Lambis Orobajo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Geólogo

Director:
Ph.D. Oscar Álvarez Silva

Universidad del Norte
Departamento de Física y Geociencias
Barranquilla, Colombia
2020

Dedicatoria

A Dios

Por darme vida, salud y bendecirme de maneras especiales.

A mis padres y mi hermano

Por su amor, esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional. Por estar cada día para mí y ser el aliento que me motiva a continuar. Por enseñarme que Dios está conmigo siempre.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la Corporación Regional Autónoma del Caribe (CRA) por proporcionarme los datos para poder realizar este proyecto. A Hugo Cañas por inspirarme al estudio de la rama de la Hidrogeología, por sus consejos y las oportunidades brindadas.

A Oscar Álvarez por su paciencia, corrección y acompañamiento en este trabajo, por adoptarme y exigirme. A Carolina Martínez por ser guía, apoyo emocional y servir de mentora en todo el recorrido de esta eapa. A todos los docentes del programa de Geología por brindar su conocimiento y cada compañero que hizo especial la vida en la universidad.

Resumen

El Sistema Acuífero de Sabanalarga, ubicado en el departamento del Atlántico y comprendido principalmente por los municipios de Baranoa y Sabanalarga, se consolida como el segundo sistema de mayor extensión en el departamento y el primero con mayor aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en el sector doméstico y de abastecimiento público; La carencia de información detallada y actualizada que permita el diagnóstico de la vulnerabilidad del medio acuífero representa una limitación para la elaboración de planes de Manejo Ambiental. Por ello, el presente trabajo de grado analizó los parámetros tenidos en cuenta por el método DRASTIC para la evaluación de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, valorando la profundidad del nivel freático, la recarga, material de la zona no saturada, el tipo de suelo, la pendiente del terreno, la litología y estructura del medio acuífero y la conductividad del acuífero. Los rangos de valoración para cada parámetro son establecidos por el método. A partir del análisis de las características en el área se genera un mapa para la vulnerabilidad del Sistema Acuífero en estudio. Los resultados de este trabajo indican que la vulnerabilidad es principalmente moderada, variando hacia la zona norte y sur del área de estudio. Los índices de vulnerabilidad indican que el sistema puede ser mayormente susceptible a contaminantes que sean continuamente descargados o lixiviados.

Palabras clave: agua subterránea, acuífero, vulnerabilidad intrínseca, Sistemas acuíferos, parámetros.

Abstract

The Sabanalarga Aquifer System, located in the department of Atlántico and mainly compound by the municipalities of Baranoa and Sabanalarga, is consolidated as the second largest system in the department and the first with the greatest use of underground water resources in the domestic and public supply sector. The lack of detailed and updated information that allows the diagnosis of the vulnerability of the aquifer environment represents a limitation for the elaboration of Environmental Management plans. For this reason, the present project use the parameters taken into account by the DRASTIC method for the evaluation of intrinsic vulnerability of aquifers, evaluating the depth of the water table, the recharge, material from the unsaturated zone, the type of soil, the slope of the terrain, the lithology and structure of the aquifer and the conductivity. The evaluation ranges for each parameter are established by the method. For the analysis of the characteristics in the study area, a map is generated for the vulnerability of the Aquifer System under study. The results of this project indicate that the vulnerability is mainly moderate, varying towards the north and south of the study area. Vulnerability indices indicate that the system may be most susceptible to contaminants that are continuously discharged or leached.

Keywords: Groundwater, aquifer, intrinsic vulnerability, aquifer systems, parameters.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	4
2. Planteamiento del problema	9
3. Objetivos.....	12
3.1 Objetivo General.....	12
3.2 Objetivos específicos	12
4. Marco teórico	13
4.1 Área de estudio.....	13
4.1.1 Marco Geológico.....	15
4.1.2 Marco Estructural.....	16
4.1.3 Unidades Hidrogeológicas	16
4.2 Metodología DRASTIC	17
5. Metodología.....	21
5.1 Recopilación de datos	21
5.2 Análisis de los datos	21
5.3 Algebra de mapas.....	25
5.4 Aplicación de la metodología DRASTIC.	25
6. Resultados.	27
6.1 Parámetro de profundidad del nivel freático.	27
6.2 Parámetro de recarga.....	28
6.3 Parámetro de litología y estructura del medio acuífero	29
6.4 Parámetro tipo de suelo.....	30
6.5 Parámetro de topografía del terreno.	31
6.6 Parámetro impacto de la zona no saturada.....	32

6.7 Parámetro de conductividad.....	33
7. Análisis de resultados	34
8. Conclusiones y recomendaciones	37
8.1 Conclusiones	37
8.2 Recomendaciones	39
Bibliografía.....	40

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de sistemas acuíferos del departamento del Atlántico.	6
Figura 2. Fuente principal de abastecimiento y usos del agua subterránea. Tomado de SHI (2016).	7
Figura 3. Distribución de los puntos de agua para el departamento del Atlántico a partir de la información de Ingeominas (1985).....	11
Figura 4. Distribución de puntos de agua del departamento del Atlántico a partir del trabajo de campo realizado por SHI (2016).....	11
Figura 5. Área de estudio.....	14
Figura 6. Evapotranspiración y precipitación media anual para años representativos de condiciones climatológicas promedio.	23
Figura 7. Evapotranspiración y precipitación media anual para el año 2010.....	23
Figura 8. Distribución de las profundidades del nivel freático en los puntos de agua.	27
Figura 9. Recarga en el área de estudio en mm por año.....	28
Figura 10. Unidades hidrogeológicas en el área de estudio.	29
Figura 11. Tipos de suelos en el área de estudio.	30
Figura 12. Mapa de pendiente para el departamento del Atlántico.	31
Figura 13. Naturaleza de la zona no saturada en el área de estudio.	32
Figura 14. Permeabilidad de las unidades hidrogeológicas del departamento del Atlántico.	33
Figura 15. Resultados de los índices de vulnerabilidad para cada parámetro de la metodología Drastic.....	34
Figura 16. Mapa de vulnerabilidad Drastic para el área de estudio.	36

1. Introducción

El agua es un recurso natural renovable pero finito, que cubre más del 70% de la superficie del planeta tierra. Es fuente de vida e indispensable para la regulación climática. Sin embargo, del volumen de agua total presente en el planeta únicamente el 2,5% es agua dulce; de los cuales el 80% corresponde a los glaciares y el hielo de los cascos polares, el 19% al agua subterránea y solamente el 1% al agua superficial que es mayormente aprovechada por el ser humano, (Fernández C, 2012).

El agua subterránea es un recurso natural valioso e importante pues se constituye como un componente esencial en el ciclo hidrológico, cumpliendo funciones ambientales por su contribución a los caudales de ríos, humedales, estuarios, manantiales y lagos. Cumple también un papel importante en muchos procesos geológicos y se presenta como solvente activo por lo que el flujo subterráneo actúa como vehículo en el transporte de contaminantes o en el control de la intrusión de aguas salinas (Custodio & Younger, 2001).

Los acuíferos, que conforman el medio que acumula el agua subterránea, pueden contaminarse por sustancias de origen natural o humano, causando un deterioro en la calidad de sus aguas. El término de vulnerabilidad de aguas subterráneas introducido por Margat (1968) hace referencia al grado de sensibilidad o susceptibilidad que tiene el acuífero de contaminarse por sustancias que alteren su química y que migran desde la superficie, partiendo del hecho de que la zona no saturada o vadosa, que separa al nivel freático de la superficie, provee un cierto grado de protección a las aguas subterráneas debido a sus características o propiedades que pueden impedir la infiltración de sustancias contaminantes

al medio poroso que almacena el agua; Cuando estas propiedades favorecen la infiltración se considera que el grado de vulnerabilidad es mayor. Por lo tanto, esta definición parte del supuesto de que los contaminantes artificiales logran transmitirse a partir de vertimientos directos o el flujo que se facilita por el agua proveniente de la precipitación. En la actualidad existen dos corrientes principales que definen la vulnerabilidad dependiendo de los factores o parámetros a estudiar. La primera establece el término de Vulnerabilidad Intrínseca al considerar que la vulnerabilidad es una propiedad exclusiva del medio acuífero, por lo tanto, tiene en cuenta factores como la permeabilidad, la cobertura del suelo, la pendiente de la superficie, recarga, litología, estructura, entre otros, Vrba & Zaporozec(1994). Mientras que la segunda corriente apoya la Vulnerabilidad Especifica al reconocer, además del medio, la incidencia de las sustancias a partir de la carga y el tipo de contaminante, EPA(1991). Por ello, se han creado metodologías que se emplean para cualificar y mapear la información de los parámetros requeridos en el estudio de la vulnerabilidad para así lograr evaluar este parámetro.

Con base en criterios geológicos e hidrogeológicos se presenta para Colombia una delimitación de zonas hidrogeológicas definidas por la posibilidad que tiene la roca de almacenar y transmitir el agua subterránea. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en el 2010 presentan la identificación de provincias hidrogeológicas para el país, reconociendo 16 provincias en total. Posteriormente identifica y delimita los sistemas acuíferos que componen las provincias hidrogeológicas, (IDEAM, 2013). Para el departamento del Atlántico se definen zonas de media a buena capacidad hidrogeológica, Ingeominas (2000), los principales sistemas acuíferos corresponden a depósitos terciarios y cuaternarios en las cuales el reservorio puede ser de tipo libre a

semiconfinado dada la naturaleza y el origen de las unidades, v. El departamento del Atlántico se encuentra dentro de la provincia hidrogeológica costera de Sinú-San Jacinto y lo componen siete sistemas acuíferos como se observa en la Figura 1. Por su lado, la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) señala los principales usos de agua subterránea en el departamento, destacando el sector pecuario, agrícola e industrial, Cra (2016).

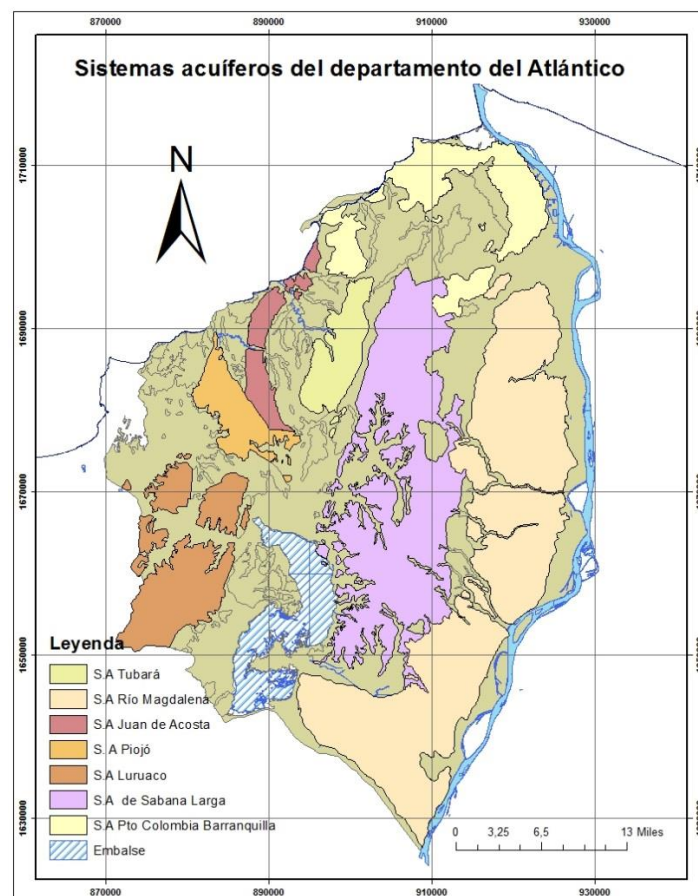


Figura 1. Mapa de sistemas acuíferos del departamento del Atlántico.

El Sistema Acuífero de Sabanalarga se posiciona como el segundo sistema con mayor extensión en el departamento del Atlántico, comprende los municipios de Baranoa, Sabanalarga, Polonuevo y Usiacurí. El estudio realizado a partir de información recopilada en campo por la empresa Servicios Hidrológicos Integrales (SHI) en el 2015, donde inventariaron 72 puntos de agua subterránea pertenecientes al Sistema Acuífero de Sabanalarga y Tubará, establece los usos del agua subterránea en las poblaciones que se encuentran aprovechando este recurso dentro del área de estudio. En la Figura 2 se puede observar que, dentro de los 72 puntos inventariados en estas zonas, el 85.2% tienen como fuente principal de abastecimiento el agua subterránea, el 9.3% el acueducto municipal y solo el 5.6% fuentes como el jagüey.

El uso de estas aguas subterráneas favorece el 47% al sector pecuario, seguido con el 16% al sector doméstico y de abastecimiento público (Ver Figura 2), principalmente en localidades como Sibarco y Pital de Megua (Baranoa) e Isabel López y Agua de Pablo (Sabalarga). En comparación con el Sistema Acuífero del Río Magdalena, cuya extensión es la mayor en el Atlántico, el de Sabanalarga presenta un mayor uso del agua subterránea



Figura 2. Fuente principal de abastecimiento y usos del agua subterránea. Tomado de SHI (2016).

Por lo tanto, este trabajo parte del hecho de que el recurso hídrico subterráneo es una fuente importante para municipios como Baranoa y Sabanalarga, y su calidad química es de vital importancia. Por ello, se evaluará la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga a partir de la aplicación de la metodología DRASTIC, que constituye uno de los métodos de índices y superposición más utilizados para evaluar el grado de vulnerabilidad intrínseca a partir de la valoración de parámetros exclusivos del medio acuífero como la profundidad del nivel freático, la recarga, litología y estructura del medio acuífero, el tipo de suelo, pendiente, naturaleza de la zona no saturada y la conductividad. Posterior a este paso y tras la clasificación de las variables para cada parámetro, se busca el índice de vulnerabilidad DRASTIC para la zona de estudio a partir de la superposición ponderada de los siete parámetros del método.

2. Planteamiento del problema

A pesar de que las aguas subterráneas poseen un mayor grado de protección a contaminantes y variaciones climáticas que las aguas superficiales, éstas necesitan de un análisis detallado de los factores que intervienen en su ciclo hídrico y en las características y propiedades del medio que las almacena, para determinar así su grado de vulnerabilidad y su exposición a sustancias o procesos que alteren su calidad. Por lo tanto, se requiere análisis de los datos de las propiedades intrínsecas de los cuerpos de agua subterránea como el nivel freático, la litología y estructura del acuífero, conductividades, material de la zona no saturada, tipo de suelo, pendiente, etc.

Según el Estudio Nacional del Agua (ENA, 2018) solo se tiene identificado el 30,8% de sistemas acuíferos de Colombia con un nivel de conocimiento suficiente para la gestión de las aguas subterráneas, mientras que el resto aún no ha logrado generar información hidrogeológica detallada que permita la caracterización de estos sistemas acuíferos.

En el departamento del Atlántico los estudios realizados con el fin de contribuir al conocimiento de las unidades acuíferas, la caracterización de los parámetros hidrogeológicos y el análisis de la calidad del agua para reconocer las condiciones y capacidades de los pozos en las unidades hidrogeológicas se encuentran desactualizados.

En la década de los 70- 80 se realizaron estudios de carácter regional en Colombia, dentro del cual se publicó en 1985 por Ingeominas el “Resumen de la hidrogeología de los departamentos del Atlántico y Bolívar al norte del canal del dique” con información completa y pertinente en 555 puntos de agua dentro de los cuales sólo 23 carecen de información de

niveles freáticos. Hasta el momento se ha consolidado como el estudio más detallado realizado en el departamento del Atlántico en conocimiento hidrogeológico. La Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) bajo la consultoría realizada por Servicios Hidrológicos Integrales (SHI) para el 2016 presentó el “Diagnóstico preliminar de los acuíferos del departamento del Atlántico en el marco de la elaboración de los planes de manejo de acuíferos”, donde proponen un plan de trabajo y presentan la actualización de algunos pozos de expedientes de la CRA 2013 y el informe de Ingeominas de 1985, pero para el plan de vulnerabilidad de acuíferos utilizan algunos parámetros del informe de 1985 como la recarga del acuífero, parámetro que debe ser valorado a partir del análisis de los datos climatológicos y su variabilidad en años con condiciones climáticas distintas. Además, de que se presenta poco detalle en cuanto a la clasificación de los parámetros en la zona de estudio.

El Sistema Acuífero de Sabanalarga posee una extensión de 459Km² que después del Sistema Acuífero del Río Magdalena con una extensión de 709 Km², representa el segundo Sistema con mayor extensión e información de puntos de agua en el departamento del Atlántico. Este trabajo de grado nace de la necesidad de generar una herramienta útil y actualizada para la creación de planes de ordenamiento territorial y manejos de cuencas hidrográficas, que contribuya a garantizar la protección de los sistemas acuíferos determinando sus grados de vulnerabilidad en el departamento del Atlántico, con especial énfasis en el Sistema Acuífero de Sabanalarga.

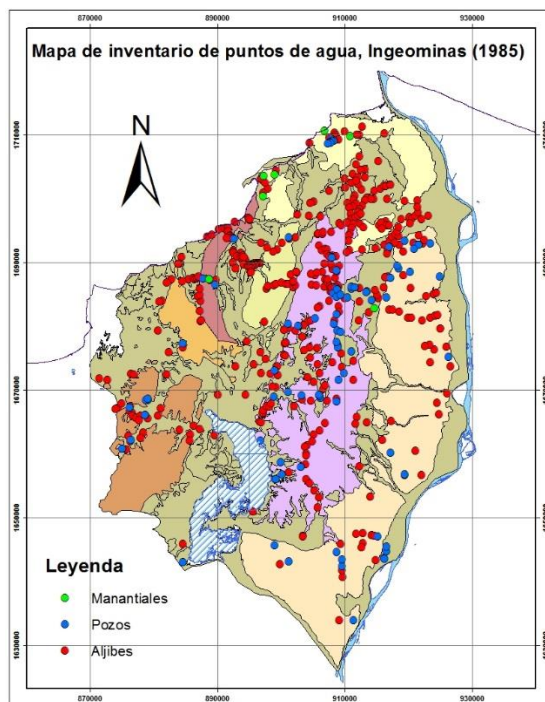


Figura 3. Distribución de los puntos de agua para el departamento del Atlántico a partir de la información de Ingeominas (1985).

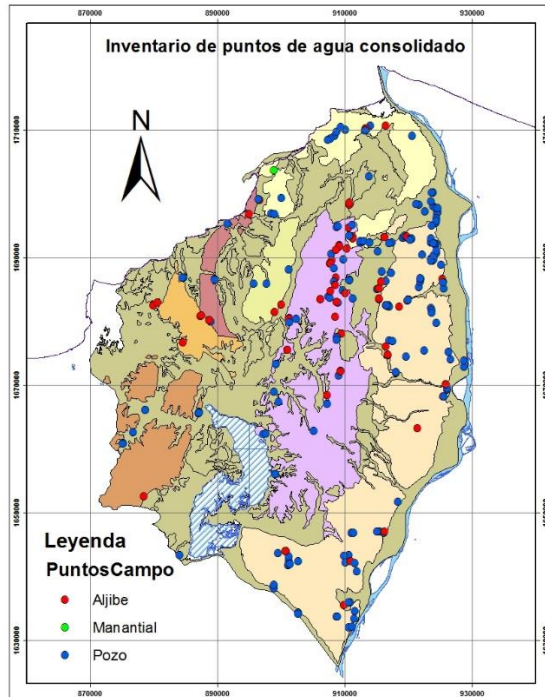


Figura 4. Distribución de puntos de agua del departamento del Atlántico a partir del trabajo de campo realizado por SHI (2016).

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Establecer un diagnóstico de la vulnerabilidad del sistema acuífero de Sabanalarga mediante la metodología DRASTIC.

3.2 Objetivos específicos

- Clasificar las variables presentadas en cada parámetro de acuerdo a la metodología DRASTIC.
- Evaluar la variabilidad del parámetro de recarga en años con diferentes condiciones hidrológicas.
- Actualizar la vulnerabilidad espacial del Sistema Acuífero de Sabanalarga.

4. Marco teórico

El departamento del Atlántico posee una extensión de 3.360 km² y se encuentra localizado en la costa norte de Colombia, limita al norte y occidente por el Mar Caribe y al oriente con el río Magdalena. El Servicio Geológico Colombiano (SGC), antiguamente llamado Ingeominas, establece en 1985 para el Atlántico siete Sistemas Acuíferos y siete unidades hidrogeológicas, que posteriormente serían corroborados y delimitados nuevamente por entidades como el IDEAM (Figura 1). Las unidades hidrogeológicas hacen referencia al conjunto de las formaciones geológicas que debido a sus características de porosidad y permeabilidad pueden agruparse y formar acuíferos. El Sistema acuífero de Sabanalarga junto con el Sistema acuífero de Río Magdalena son los únicos que se componen por dos unidades hidrogeológicas, los demás poseen una.

4.1 Área de estudio

El área de estudio del presente proyecto, Sistema Acuífero de Sabanalarga, tiene una extensión de 460 km², comprendido principalmente por los municipios de Baranoa y Sabanalarga, y seguido en menor proporción por los municipios de Usiacurí, Polonuevo, Galapa y Manatí (ver Figura 5). El Sistema acuífero de Sabanalarga cuenta con oferta significativa de aguas subterráneas que se encuentran asociadas a los depósitos cuaternarios y al Sinclinal de Sabanalarga principalmente. El clima del área de estudio es tropical con variaciones de árido hacia la costa, principalmente hacia el norte del área, a semi-húmedo entre las poblaciones de Sabanalarga y Agua de Pablo (Ingeominas, 2000). En series de tiempo de 1990-2010 el IDEAM establece que se presentan precipitaciones medias anuales

en rangos de 1000- 1500 mm para el departamento, y cerca de 1200mm anuales en zonas cercanas a las poblaciones de Sabanalarga, hacia el sur del departamento. Y temperaturas medias anuales de 27°C. A partir de sus características estructurales se establece como un sistema con acuíferos multicapa, libre o en condiciones semiconfinadas relacionados al sinclinal de Sabanalarga.

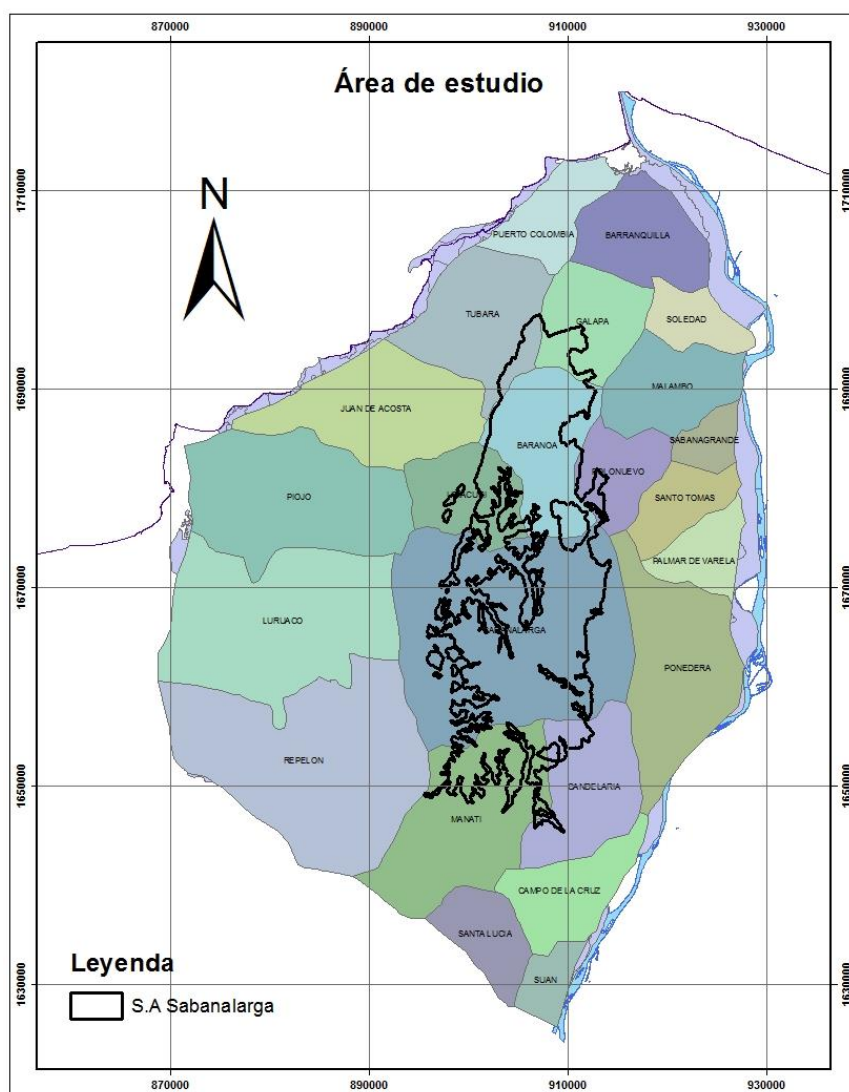


Figura 5. Área de estudio.

4.1.1 Marco Geológico

En el área de estudio se encuentran aflorando sedimentos del cuaternario y rocas sedimentarias terciarias descritas principalmente por Caro (1984) y unidades dentro del Cinturón San Jacinto estudiadas en detalle por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH 2006), Para el año 2000 Igeominas realizó un estudio para actualizar la información de las formaciones y a partir del análisis de esta información se presenta que dentro de la zona de estudio afloran.

- Depósitos Aluviales de Terrazas (Q6) Se compone de sedimentos limo-arcillosos en el tope e intercalaciones de gravas, arenas gruesas y limos hacia la base, de origen continental fluvial, con edades del Pleistoceno y espesores menores a 70m.
- Areniscas friables (T3): Areniscas y conglomerados friables de origen Fluvio lacustre, que constan de edades del Plioceno –Pleistoceno y con espesores menores a 150m.
- Gravas de Rotinet (Q7): Conformada por alternancias de gravas con matriz arenosa y arenas con pocas intercalaciones de lodos, en su mayoría se encuentran como niveles de sedimentos inconsolidados de origen deltáico. Su porosidad es primaria. Con espesores menos a 100m y edades que constan del pleistoceno.
- Arcillolitas Calcareas (T4): Alternancia de arcillolitas y areniscas calcáreas en localidades de Baranoa y Tubará mientras que varía a secuencia arcillosa hacia el sur del sinclinal de Sabanalarga. Porosidad primaria. La formación tiene un espesor de 300 m aproximadamente y origen marino de aguas someras con edad del mioceno inferior.

- Arenisca calcárea de Santa Rosa (T5): Compuesta por Arenisca calcárea, fosilífera, con intercalaciones de arcillolitas, areniscas friables de grano grueso a conglomerático, El origen de esta unidad data del mioceno superior-plioceno en un medio acuífero de agua poco profunda (Duque, 1984).
- Conglomerado de Isabel López (T6): Expuesta en localidades de Usiacurí, son conglomerados de matriz arenosa intercalada con areniscas friables de grano medigrueso, con espesores menores a 150 depositados en ambientes fluviales del mioceno superior.

4.1.2 Marco Estructural

El departamento del Atlántico se encuentra tectónicamente ubicado en una zona de interacción de las placas Suramérica y Caribe, en la parte norte del Cinturón de San Jacinto. Ésta disposición estructural refleja intenso tectonismo al presentarse estructuras de plegamiento como el Sinclinal de Sabanalarga, denominada la mayor estructura del departamento del Atlántico, (Duque, 1984). Él sinclinal presenta en su núcleo material rocoso asociado a las Gravas de Rotinet (Q7) y en sus flancos rocas de la formación Hibácharo y Tubará. (Duque & Dueñas 1987).

4.1.3 Unidades Hidrogeológicas

El sistema acuífero de Sabanalarga está compuesto por dos unidades Hidrogeológicas, denominadas I2 Y III2.

- Unidad Hidrogeológica I2.

Conformada por las unidades geológicas: Depósitos Aluviales Terrazas (Q6), Gravas de Rotinet (Q7) y areniscas Friables (T3). Litológicamente compuesta por gravas,

arenas y conglomerados friables con intercalaciones de limos y arcillas, con permeabilidades que varían de 0.1 a 10m/d. Los estudios presentados por la CRA (2016) señala a esta unidad como un acuífero bueno, libre y semiconfinado con variación en su espesor. Y con agua de tipo bicarbonatada cálcica y sódica, poco dulce pero apta para el consumo humano.

- Unidad Hidrogeológica III2

Compuesta por tres unidades geológicas, las Arcillolitas Calcáreas (T4), Arenisca Calcárea de Santa Rosa (T5), y Conglomerado de Isabel López (T6). Conformada por conglomerado, arcillolita, arenisca fina, arenisca friable y areniscas calcáreas fosilíferas con intercalaciones arcillosas de base a techo. Localizada en la zona suroriental del Sinclinal de Sabanalarga. Se presenta un comportamiento variable en esta unidad debido a que hacia los niveles de arenisca y conglomerado que poseen permeabilidades de 0.2m/d la unidad se constituye como un acuífero regular a bueno, mientras que en algunas zonas se comporta como acuitardo debido a las formaciones geológicas con alto contenido en arcilla que permiten el almacenamiento del agua en sus poros pero el flujo de estas aguas es lento en comparación con los acuíferos, (Ingeominas, 2000).

4.2 Metodología DRASTIC

La metodología DRASTIC es un sistema de evaluación desarrollado por Aller *et al.* (1987) por medio del cual se busca determinar el potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada, que hace referencia al medio que almacena el agua subterránea, Para ello agrupa siete parámetros fundamentales que corresponden a sus siglas en inglés.

D - Profundidad al acuífero (Depth to water).

R - Recarga neta (Net Recharge).

A - Litología del acuífero (Aquifer media).

S - Tipo de suelo (Soil media).

T - Topografía, Pendiente (Topography).

I - Litología de la zona no saturada (Impact of the Vadose ZoneMedia).

C - Conductividad hidráulica (Conductivity of the aquifer).

Este modelo se basa en la combinación de los siete parámetros, a los que se le aplica una puntuación cuantitativa, que va del 1(mínima vulnerabilidad) al 10 (Máxima vulnerabilidad) y se le asigna un valor distinto de ponderación para cada uno, que depende de su influencia dentro de la evaluación de la vulnerabilidad (va de 1 a 5). El resultado final es conocido como el índice de vulnerabilidad DRASTIC que al ser analizado permite clasificar la vulnerabilidad de los acuíferos que varía desde muy baja, baja, media, alta, extrema. El valor índice se obtiene entonces de:

$$V = (Dr \cdot Dw) + (Rr \cdot Rw) + (Ar \cdot Aw) + (Sr \cdot Sw) + (Tr \cdot Tw) + (Ir \cdot Iw) + (Cr \cdot Cw)$$

Donde el valor r indica factor de clasificación o valoración y w indica factor de ponderación.

Tabla 1. Descripción del tipo de vulnerabilidad obtenida por el índice DRASTIC.

Vulnerabilidad	Definición
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Baja	Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
Muy baja	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

Parámetro D (Profundidad al acuífero): Se refiere a la distancia que existe entre la superficie del suelo y el nivel en el que se encuentra el agua subterránea (nivel freático).

Parámetro R (Recarga): La recarga neta corresponde al volumen total de agua por unidad de área que nutre al acuífero durante un cierto tiempo. Este parámetro resulta primariamente de la fracción de precipitación que no sufrió evapotranspiración y de la escorrentía superficial. Lo cual, la convierte en el principal vehículo transportador de los contaminantes.

Parámetro A (Litología y estructura del medio acuífero): Este parámetro radica en las características litológicas y estructurales del medio acuífero, hace referencia a la capacidad que tiene el acuífero, a partir de las características de porosidad, para permitir el flujo de los contaminantes.

Parámetro S (Tipo de suelo): Representa al tipo de material que tiene el suelo, definiendo la capacidad que tiene éste de atenuar la movilización de contaminantes. Cuando el suelo presenta actividad biológica significativa contribuye a la atenuación de la carga contaminante. La vulnerabilidad es menor al encontrar material fino y orgánico.

Parámetro T (Topografía, Pendiente): Concierno a la pendiente topográfica de la zona de estudio. Este parámetro se obtiene del Modelo Digital del Terreno (DEM) de resolución 25m para el territorio del departamento del Atlántico.

Parámetro I (Impacto de la zona no saturada): Las características que tenga la zona no saturada son de gran importancia a la hora de evaluar la vulnerabilidad, ya que es la primera defensa natural del acuífero contra los contaminantes y representa la capacidad que tiene el suelo para obstaculizar el transporte vertical (Vargas, 2010).

Parámetro C (Conductividad hidráulica): La conductividad hace referencia a la facilidad que el medio acuífero ofrece a ser atravesado por un fluido. Esta propiedad se obtiene de las pruebas de permeabilidad realizadas en campo. Para Vargas (2010) este parámetro se define como la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por una unidad de sección.

5. Metodología

5.1 Recopilación de datos

En esta etapa se recopilaron los datos a partir de información secundaria.

Fuentes principales de información.

- Corporación Regional del Caribe (CRA): De donde se obtuvo la información de coordenadas, niveles freáticos y estratigrafía de los puntos de agua a partir de la revisión de expedientes de la CRA (2013), Ingeominas (1985), SHI (2015).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM): De los datos abiertos en la web se extrajo la información de las Estaciones en el departamento del Atlántico para los valores de precipitación, radiación solar, temperatura.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC): Se obtuvo información de los suelos, relieve y litología a través de los Shapes de suelos.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC): Compartió el Modelo Digital de Elevación (DEM).

5.2 Análisis de los datos

En esta etapa se buscó filtrar los datos relevantes para llevar a cabo los objetivos del proyecto; se organizó la información para realizar el análisis detallado de cada factor tenido en cuenta como propiedades intrínsecas del medio acuífero de estudio.

- Para el análisis de las profundidades del acuífero se obtuvo, en primera instancia, un consolidado de 255 puntos de agua para el departamento del Atlántico con información

actualizada del año 2015, donde 144 puntos de agua poseen información de los niveles freáticos, valores obtenidos a partir las mediciones realizadas en campo por la empresa Servicios Hidrogeológicos Integrales en 2015.

- A partir de los datos hidrológicos se indican las posibilidades de recarga dentro del sistema acuífero de Sabanalarga, al estimar la precipitación efectiva en años representativos de condiciones promedios y de condiciones húmedas, dando un índice de la recarga potencial o la posible infiltración. De los registros de precipitación media anual del IDEAM de 1990-2010 se establecieron años representativos de condiciones climatológicas promedios (2001-2005), mientras que para el año 2010 se registran anomalías climáticas de en rangos de 120- 160% en la zona de estudio debido al fenómeno climático ENSO, IDEAM (2014).

Las estaciones del IDEAM (28 estaciones meteorológicas para el Atlántico) permitieron obtener los datos de precipitación. El cálculo de la evapotranspiración real se obtiene a partir de métodos empíricos como el establecido por Turc (1961)

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde ETR es evapotranspiración real en mm/año.

P precipitación mm/año.

$$L = 300 + 25t + 0,05t^3$$

T= temperatura media anual en °C.

Esta fórmula puede usarse en regiones donde la temperatura promedio es mayor a 20° y la tasa de precipitación es alta. En nuestra área de estudio la temperatura promedio es de 27°C.

En la figura 6 y 7 se comparan las evapotranspiraciones y precipitaciones para años en condiciones promedio y en años afectados por el fenómeno ENSO.

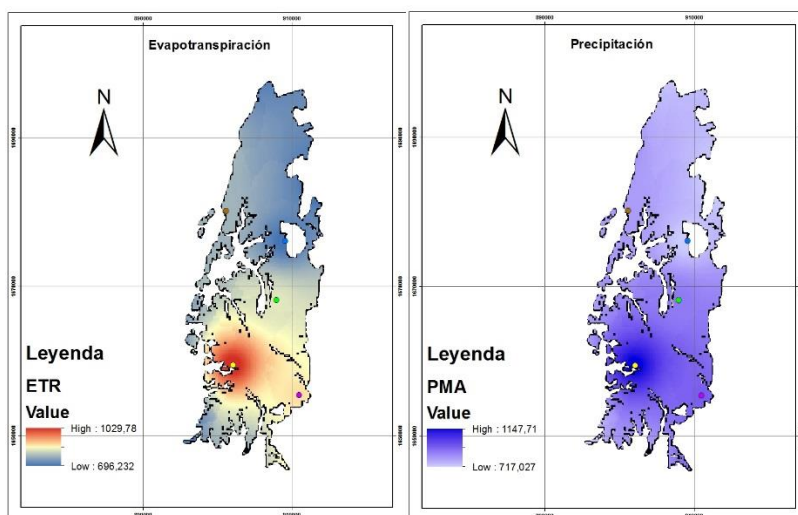


Figura 6. Evapotranspiración y precipitación media anual para años representativos de condiciones climatológicas promedio.

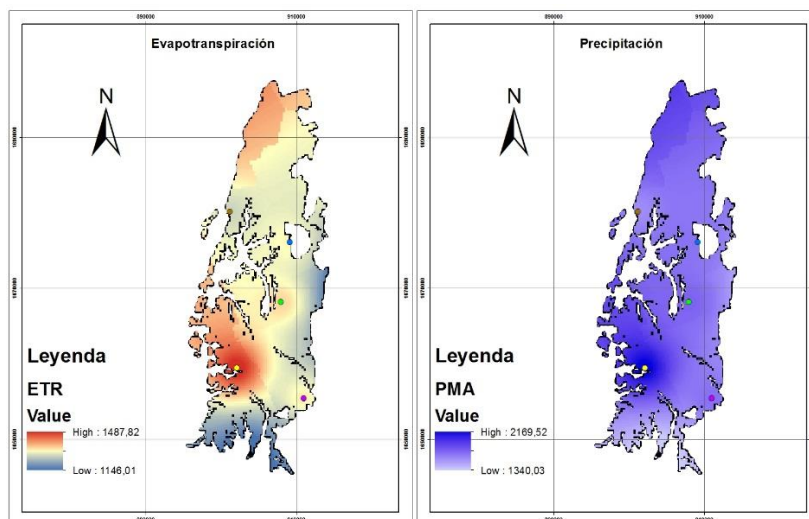


Figura 7. Evapotranspiración y precipitación media anual para el año 2010

El método de Turc establece que para años influenciados por el fenómeno ENSO (donde los valores de precipitación son muy altos) el parámetro de recarga registra valores mayores a 330mm anuales en las estaciones dentro del área de estudio. Mientras que en años representativos de condiciones promedio la mayor infiltración aproximada fue de 118 mm en el Sistema acuífero de Sabanalarga (Estación Campanos). Sin embargo, se recomienda que el parámetro de recarga deba estudiarse teniendo en cuenta datos obtenidos en campo a partir de equipos especializados como lisímetros, permeámetros, técnicas de anillo, entre otros, que disminuyan el margen de error y provean información de la humedad del suelo, la escorrentía superficial, para el análisis de las descargas dentro de un balance hídrico, O hallar una mayor aproximación al trabajar con datos que permitan establecer valoraciones diarias, debido al margen de error que puede dar en zonas con precipitaciones muy bajas.

Las aproximaciones dadas a partir de los datos para la precipitación por promedio anual en temporadas húmedas (meses de agosto a noviembre) para años en condiciones promedios (2001-2005) y el análisis hidrogeológico del área de estudio por su parte permiten realizar una aproximación y análisis cualitativo de la recarga de acuíferos. Estos análisis fueron comparados con los obtenidos por Ingeominas y descritos por SHI (2016) donde se establecen áreas de mayor infiltración a menor infiltración. Las zonas donde se exponen las unidades I2, III2 son descritas por Ingeominas como zonas con mayor posibilidad de infiltración a partir del análisis hidrogeoquímico y de campo.

5.3 Álgebra de mapas.

A partir de la tecnología del Software ArcMap de ArcGis 10.4 se facilitó el manejo de la información para la georeferenciación, reclasificación, cálculos raster y superposición de los parámetros. Para la georeferenciación se definieron las coordenadas geográficas GCS_WGS_1998 para el mapeo de las variables climáticas. Los shapes de polígonos obtenidos por la CRA están en coordenadas geográficas GCS_MAGNA y se proyectaron a MAGNA_Colombia_Bogotá. La interpolación de los datos de profundidad del agua subterránea necesitó de la herramienta IDW que permite la interpolación de puntos a superficie raster. Se generó el mapa de pendientes a partir del modelo digital de elevación (DEM) de resolución 25m, por la herramienta de Slope en surface. Todos los mapas tipo polígono debieron convertirse a raster y se valoraron a partir de la herramienta de reclasificación raster con los pesos determinados por la metodología DRASTIC.

La herramienta de Raster calculator en Spatial Analyst tools facilitó la implementación de las ecuaciones descritas en el índice anterior para los valores de evapotranspiración, escurrimiento. El mapa final con índice DRASTIC de vulnerabilidad se generó a partir de la superposición ponderada realizada con la herramienta Weighted overlay; donde se establecieron valores de peso (ponderación) para los siete parámetros ya reclasificados.

5.4 Aplicación de la metodología DRASTIC.

La tabla 2 muestra los valores de clasificación para cada parámetro y su peso o ponderación dentro de la metodología DRASTIC, la tabla enseña la valoración de las variables presentadas en este trabajo para cada parámetro.

Tabla 2. Valoración de los parámetros según la metodología DRASTIC.

Ponderación	Parámetro	Rangos	Valor
5	Profundidad del nivel freático (m)	0 - 1,5 1,5 - 4,6 4,6 - 9,1 9,1 - 15,2 15,2 - 22,9 22,9 - 30,5	10 9 7 5 3 2
4	Recarga neta (mm)	>259 179-254 103-178 50-130 0-50	9 8 6 3 1
3	Litología y estructura del medio acuífero	Arenas y gravas Secuencias de areniscas, calizas, lutitas Arcillolitas, areniscas fosilíferas, limos Lodolita, arcillolita	8 6 5 2
2	Tipo de suelo	Delgado, ausente, grava Arena Agregado arcilloso o compactado Arenisca margosa Marga Limo Margoso Arcilla Margosa Arcilla no compactada	10 9 7 6 5 4 3 1
1	Topografía del terreno (%)	0 - 2 2 - 6 6 - 12 12 - 18 >18	10 9 5 3 1
5	Impacto de la zona no saturada o vadosa	Grava y arena Arena o grava con contenido de arcilla significativo Secuencia de arenisca, lutita, caliza Lutita, arcilla	8 6 6 6 3
3	Conductividad hidráulica(m/d)	0,04 - 4,08 4,08 - 12,22	1 2

6. Resultados.

6.1 Parámetro de profundidad del nivel freático.

En la Figura 7 se observa la distribución de los puntos de agua y la profundidad a la que se encuentra el nivel freático en el área de estudio. Hacia el norte del sistema acuífero, en el municipio de Baranoa y el sur de Galapa, se registra la mayor densidad de puntos de agua. La profundidad con mayor número de registros se encuentran entre los rangos de 1,5 a 4,6m, localizándose en Baranoa 12 pozos con estas profundidades. Los puntos de agua con menor profundidad 0 – 1,5m se registran en Usiacurí (2 pozos), Baranoa (2 pozos) y uno en Sabanalarga. Mientras que los pozos con mayor profundidad de agua subterránea (22,9 a 30,5 m) tienen un total de 6, localizados 5 en Baranoa y 1 en Galapa. Se encontraron dos pozos saltantes, uno en el municipio de Sabanalarga y otro el municipio de Tubará.

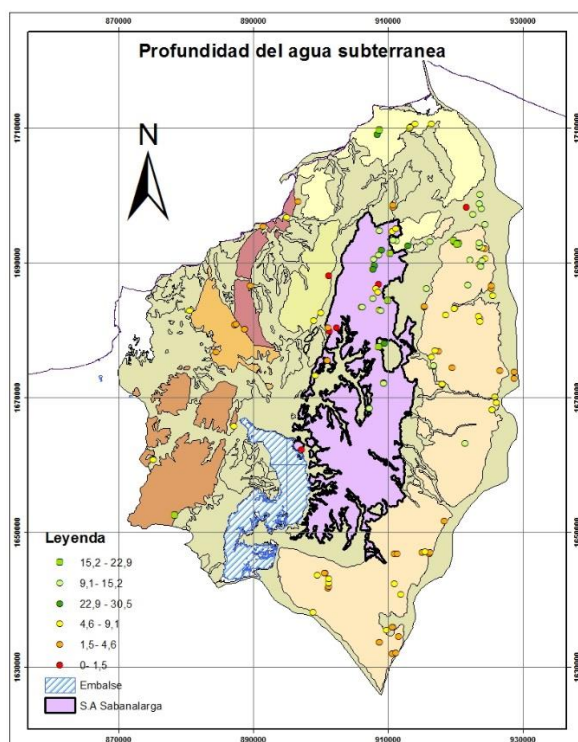


Figura 8. Distribución de las profundidades del nivel freático en los puntos de agua.

6.2 Parámetro de recarga.

En la figura 9 se presentan los resultados de la recarga por la fracción de precipitación que no sufrió evapotranspiración en el área de estudio. A partir del cálculo se observa que los mayores valores registrados se presentaron en la estación Los Campanos en el municipio de Sabanalarga con magnitud de 118mm, mientras que el de menor valor se presenta en la estación Montebello hacia el municipio de Baranoa.

Para la estimación cualitativa de la recarga para la valoración de la vulnerabilidad se tiene en cuenta la unidad hidrogeológica expuesta y su capacidad de infiltrar el agua superficial. Estudios anteriores determinan que dentro de la Zona de estudio de este trabajo las unidades I2 Y III2 presentan gran posibilidad de infiltración.

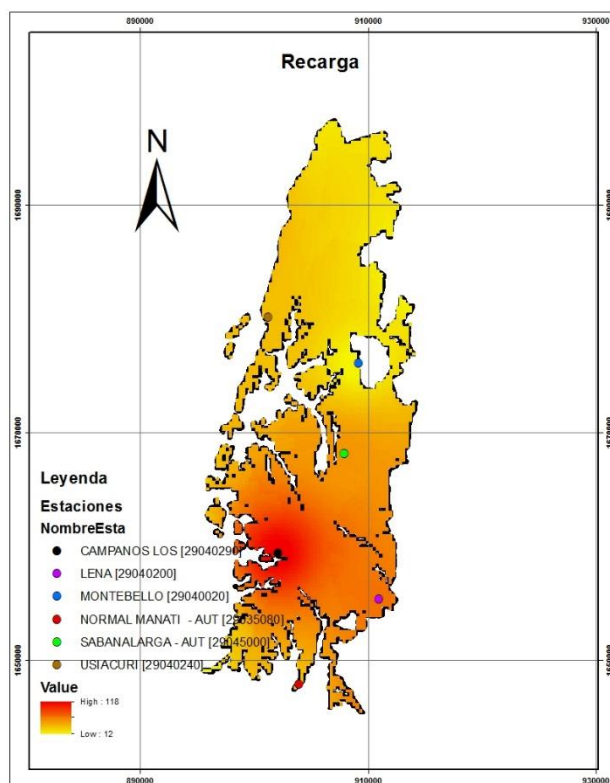


Figura 9. Recarga en el área de estudio en mm por año.

6.3 Parámetro de litología y estructura del medio acuífero

En el área de estudio se exponen las formaciones pertenecientes a la Unidad Hidrogeológica I2 y III2. La primera de estas unidades (I2) se encuentra hacia el centro del sistema acuífero y está conformada por las unidades geológicas: Depósitos aluviales (Q6), Gravas de Rotinet (Q7), Areniscas Friables (T3), que se componen litológicamente por gravas, arenas y conglomerados con algunas intercalaciones de arcillas y limos. La segunda unidad, que se encuentra hacia las zonas laterales del Sistema, occidente y sur oriente está conformada por Arcillolitas calcáreas (T4), Conglomerados de Isabel López (T6) y Areniscas calcáreas de Santa Rosa (T5) que se componen por areniscas calcáreas, fosilíferas, arcillolitas, areniscas con intercalaciones de arcillas, materiales más finos que la unidad I2, ver figura 10. Comparado con información de algunos pozos estudiados.

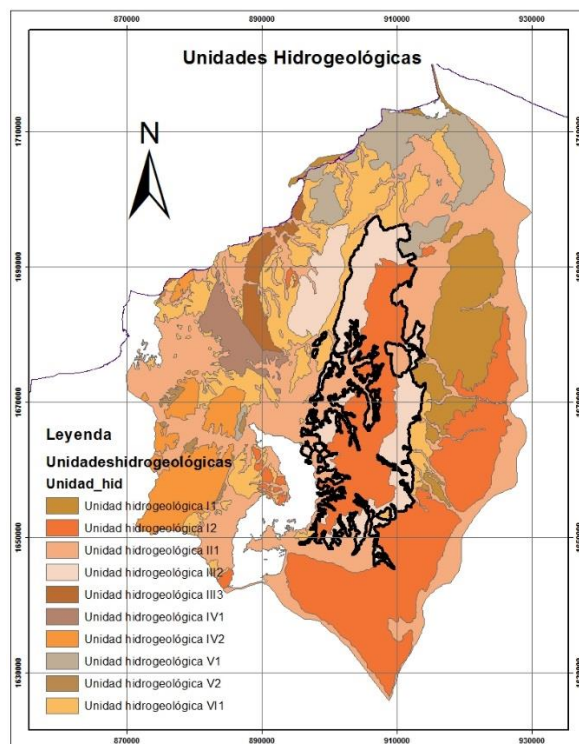


Figura 10. Unidades hidrogeológicas en el área de estudio.

6.4 Parámetro tipo de suelo.

En la figura 11 se exponen los tipos de suelos clasificados según la metodología DRASTIC y a partir de la información dada por el IGAC. En la zona oriental del sistema acuífero, cubriendo la mayor extensión del área de estudio, se observan suelos que poseen mayor contenido en material arcilloso y un 20% a 40% de material arenoso, estos suelos son conocidos como marga arcillosa. Hacia el noroccidente se exponen suelos ricos en agregados o mezcla de limos y arenas principalmente. Hacia la zona occidental del municipio de Sabanalarga se presentan suelos compuestos por arenas y finos como arcilla y limo con alto contenido significativo de materia orgánica. Las zonas en color amarillo representan el suelo con mayor composición de arenas seguidos por intercalaciones de finos. En la clasificación de los suelos se expusieron las zonas urbanas con color gris, que no tienen información muy relevante de sus tipos de suelos.

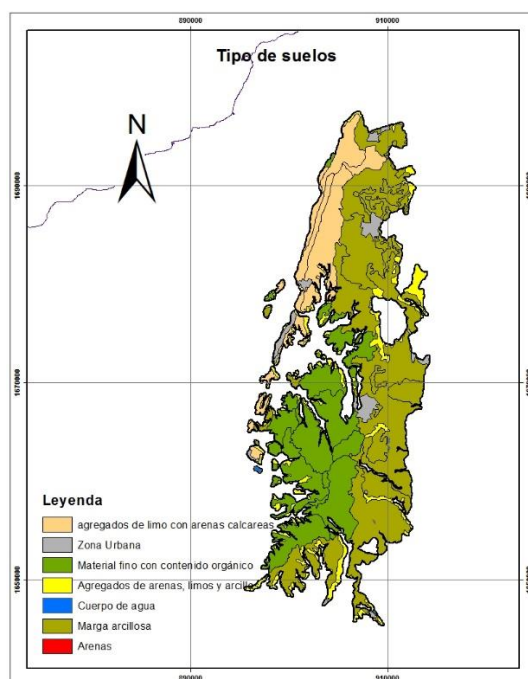


Figura 11. Tipos de suelos en el área de estudio.

6.5 Parámetro de topografía del terreno.

El mapa de pendientes para el departamento se realizó a partir de la herramienta Slope que convierte los valores a porcentajes para el área de estudio (Como se menciona en la metodología del trabajo). De este mapa se obtiene que en la superficie se presentan la mayoría de valores entre los porcentajes de 2 a 6 % (se observa señalado por naranja, número 9 en la figura 12) seguido por pendientes del 0-2% lo que indica que para el departamento las pendientes son muy bajas. Hacia la zona occidental las pendientes poseen valores mayores.

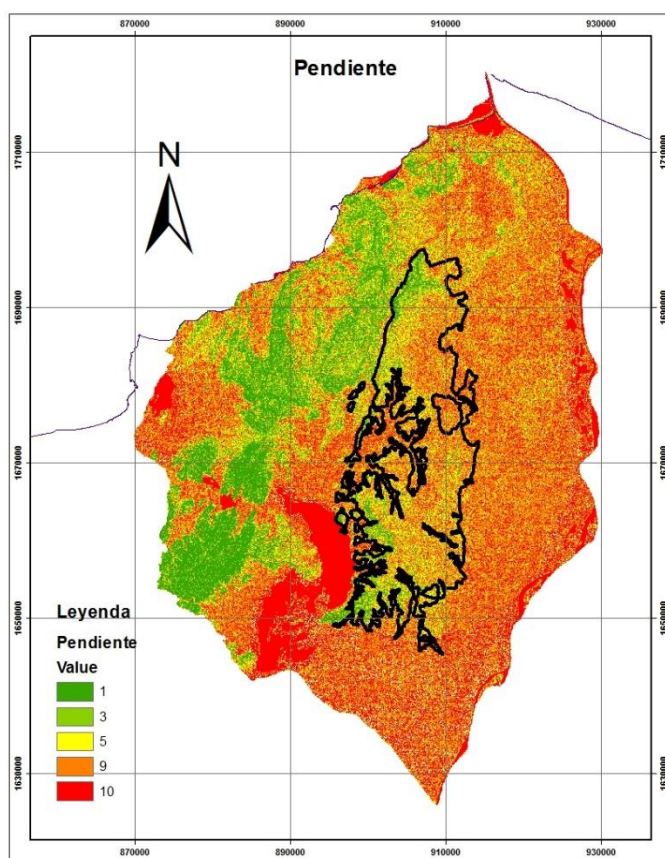


Figura 12. Mapa de pendiente para el departamento del Atlántico.

6.6 Parámetro impacto de la zona no saturada.

La litología de la zona no saturada se presenta en la figura 13. Se observa gran contenido de rocas clásticas de grano fino (Lutitas), con partículas de tamaños de limos y arcillas, ocupando la mayor extensión del municipio de Baranoa. Hacia Usiacuí (Margen occidental) se presentan arcillolitas, lutitas y areniscas fosilíferas con intercalaciones de limos. En el área de Sabanalarga se exponen areniscas de grano medio-fino con lutitas grises (lutitas con mayor contenido de materia orgánica), hacia el sur oriente de este municipio afloran lutitas micáceas blancas que corresponden a rocas de grano fino que poseen laminación sin convertirse en rocas metamórficas. En mucha menos proporción se observan depósitos aluviales limoarcillosos hacia la el sur del Sistema acuífero, que se relaciona con los flujos de aguas superficiales; hacia el occidente se presentan también depósitos mixtos.

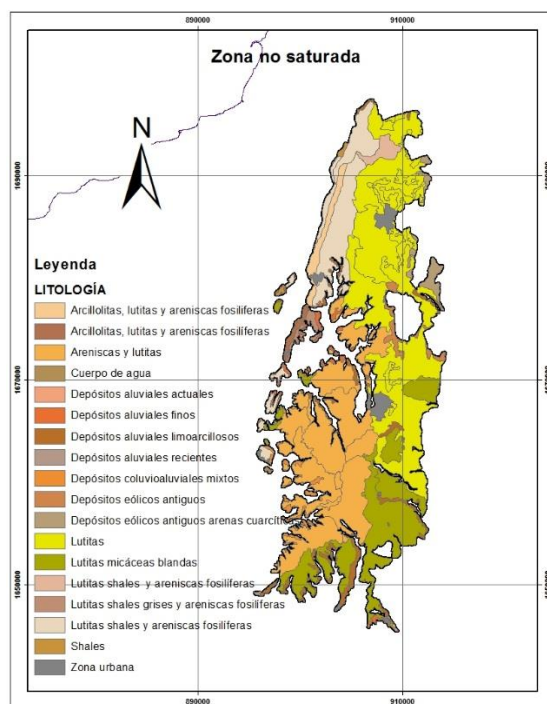


Figura 13. Naturaleza de la zona no saturada en el área de estudio.

6.7 Parámetro de conductividad

Los estudios realizados en campo por organizaciones y empresas como Ingeominas y SHI, establecieron los valores de conductividad para establecer la permeabilidad de las unidades hidrogeológicas presentes en el departamento del Atlántico (ver figura 14). En el área de estudio se presentan materiales con dos conductividades distintas, hacia los extremos del área rocas permeables con conductividades de 0,2m/d, mientras que los sedimentos permeables ubicados al centro del sistema acuífero de Sabanalarga presentan conductividades entre 0,1m/día a 10m/día.

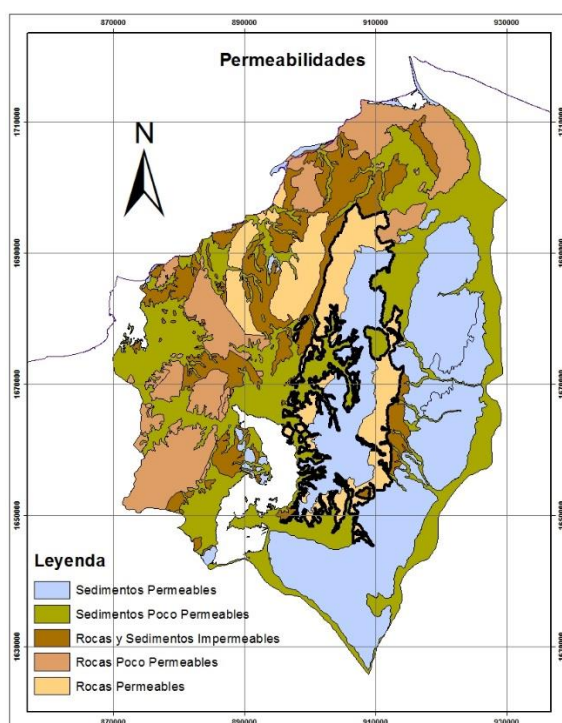


Figura 14. Permeabilidad de las unidades hidrogeológicas del departamento del Atlántico.

7. Análisis de resultados

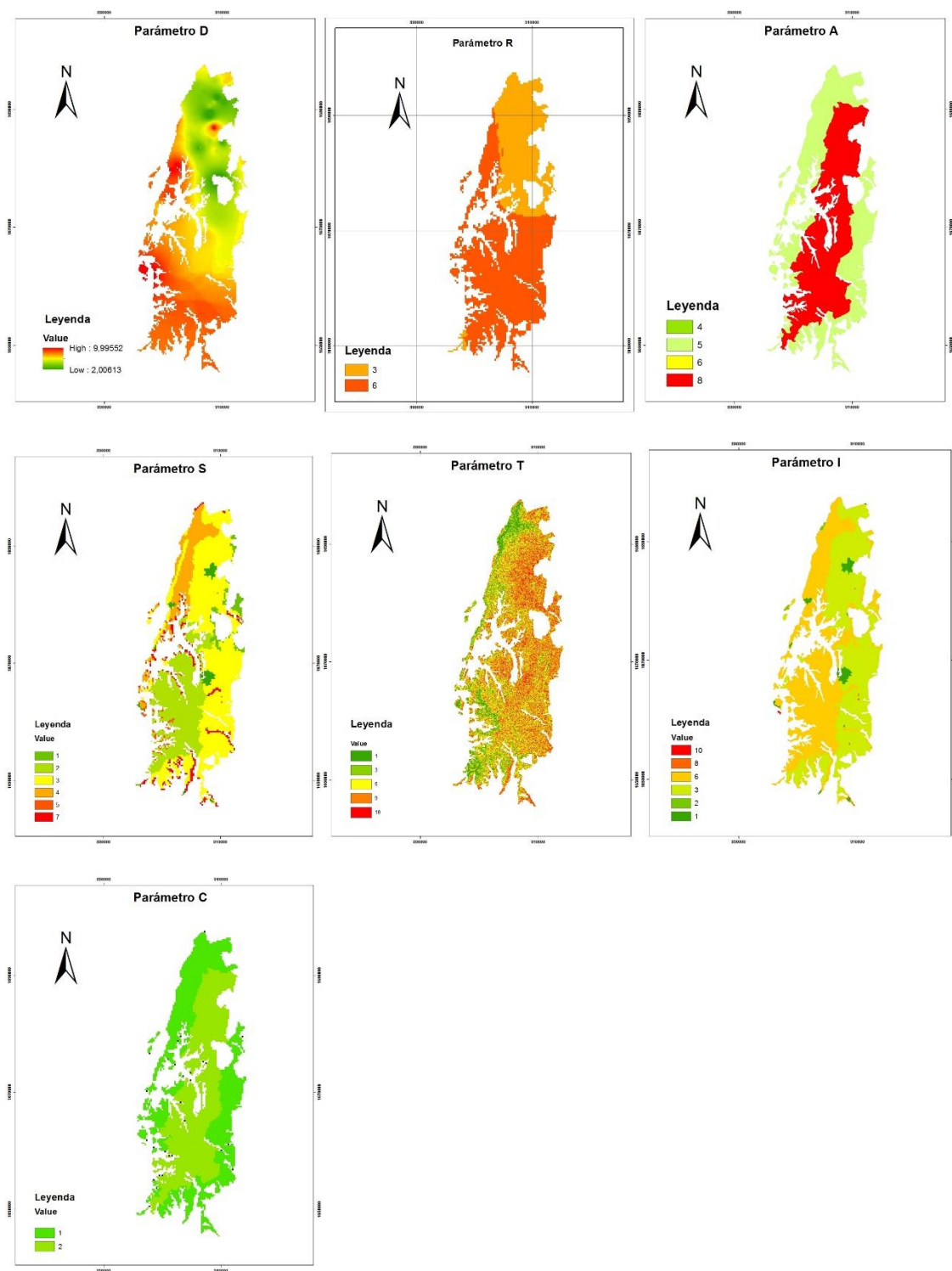


Figura 15. Resultados de los índices de vulnerabilidad para cada parámetro de la metodología Drastic.

A partir de la reclasificación según los índices DRASTIC, para cada parámetro se obtuvo la vulnerabilidad intrínseca relacionada a él. El parámetro de profundidad del nivel freático y el parámetro de la naturaleza de la zona no saturada representan los de mayor ponderación para el mapa final. En el primer parámetro se observa que a mayor profundidad los índices de vulnerabilidad son menores, mientras que al encontrarse el nivel freático más cerca de la superficie hay un aumento en la vulnerabilidad de los acuíferos, dado que la distancia del agua subterránea y la superficie reflejan el espacio que debe recorrer cualquier sustancia contaminante antes de degradar la calidad del agua. El parámetro de la naturaleza de la zona no saturada (I) refleja que en el sistema acuífero de Sabanalarga la vulnerabilidad intrínseca es de moderada a baja, dado que el material presente en la zona no saturada posee poca porosidad y permeabilidad, comportándose como una barrera protectora a la percolación de sustancias hacia el nivel freático. La recarga del acuífero presenta valores de vulnerabilidad moderada a baja. La figura 16 expone los resultados de la vulnerabilidad por el método DRASTIC tras la superposición de cada parámetro. Se observa que hacia los municipios de Sabanalarga y Usiacurí se presentan las mayores vulnerabilidades, mientras que hacia el nororiente del área de estudio las vulnerabilidades son más bajas. Las vulnerabilidades con mayor índice son las que se presentan en color rojo y representan poca extensión hacia el municipio de Sabanalarga, que puede verse mayormente relacionada a parámetros como el tipo de suelo y la profundidad.

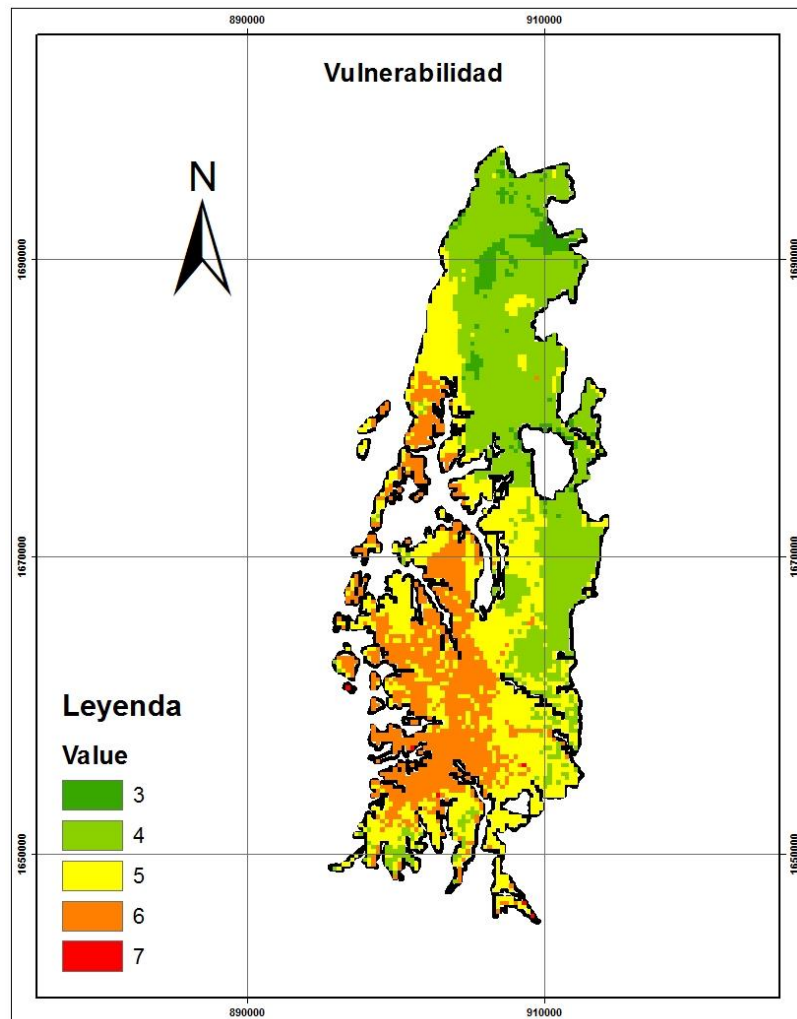


Figura 16. Mapa de vulnerabilidad Drastic para el área de estudio.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

Con información secundaria disponible se realizó el diagnóstico de la vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero de Sabanalarga a la contaminación, para esto se tuvieron en cuenta propiedades exclusivas del medio como el nivel en el que se encuentra el agua subterránea, la litología y estructura del acuífero, la naturaleza de la zona no saturada, la recarga, el tipo de suelo, la pendiente y la conductividad, utilizando la metodología DRASTIC, metodología que pondera la incidencia de cada parámetro en el resultado final. La metodología DRASTIC se consolida con uno de los métodos más usados al permitir evaluar la mayor cantidad de parámetros que intervienen en el estudio de la vulnerabilidad intrínseca, basándose en las características del medio acuífero. Los parámetros de mayor incidencia son la profundidad del nivel freático y la naturaleza de la zona no saturada. Mientras que el de menor incidencia es la pendiente y el tipo de suelo. La existencia de dos pozos saltantes en el sistema de Sabanalarga puede ser evidencia de los acuíferos multicapa que señala Ingeominas (1985) que se deben a las características del acuífero comprendido dentro del sinclinal de Sabanalarga. El parámetro de recarga neta del acuífero es el más complicado de determinar debido a la variabilidad que éste puede tener en distintas temporadas del año, y la carencia de información disponible para evaluarlo.

El Sistema de Sabanalarga presenta índices de vulnerabilidad intrínseca moderada en la mayor extensión de su territorio, lo que indica que es vulnerable a contaminantes que son descargados o lixiviados continuamente. Es importante recordar que el grado de

vulnerabilidad es una medida cualitativa y subjetiva, cuyo resultado depende del método, la calidad y la cantidad de información utilizada. En el marco de inversiones en Planes de Manejo Ambiental debe tomarse en cuenta el sistema acuífero de Sabanalarga dentro del departamento del Atlántico, debido a que según estudios anteriores CRA (2015) cerca del 49% de la población rural en esta zona se abastece del recurso hídrico subterráneo, siendo importante también en el sector industrial y en actividades agropecuarias. Posee un potencial hidrogeológico significativo debido a la naturaleza del medio acuífero y presentan rangos de vulnerabilidades medias a contaminantes de tipo natural y humano.

Por otra parte, es necesario comunicar a las poblaciones, principalmente del municipio de Baranoa y Sabanalarga, las medidas sanitarias que disminuyan el riesgo a la contaminación del agua subterránea, como establecer distancias prudentes en relación a sus pozos o aljibes y las letrinas presentes en la zona. El municipio de Baranoa registra el mayor contenido de puntos de agua inventariado, sin embargo, en su territorio se presentan vulnerabilidades medias a bajas, lo que indica que el medio en el que se conforman los acuíferos presenta menor susceptibilidad a la contaminación, por lo tanto, los factores antropogénicos directos, como la sobreexplotación de los pozos y el vertimiento continuo de sustancias contaminantes en los suelos son los que pueden representar la mayor amenaza en la zona de estudio.

8.2 Recomendaciones

Para próximos estudios de hidrogeología en el departamento del Atlántico se sugiere:

- Comparar el método DRASTIC con otros métodos que incluyan la incidencia de ciertos contaminantes (Para hallar la vulnerabilidad específica).
- Obtener mayor cobertura de información de puntos de agua, especialmente al sur del acuífero de Sabanalarga y en acuíferos secundarios como Tubará, Luruaco, Puerto Colombia-Barranquilla, a partir de pozos exploratorios o campañas de campo que permitan mapear pozos ya existentes.
- Estudiar el parámetro de recarga neta a partir de la aplicación de metodologías directas, como el uso de lisómetros y permeámetros, para obtener información actualizada de las propiedades de los acuíferos en el departamento del Atlántico.
- Establecer el balance hídrico integral en el departamento del Atlántico.
- Analizar el parámetro de la naturaleza no saturada a partir de la estratigrafía de pozos.

Bibliografía

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). 2006. Cartografía geológica en los cinturones plegados Sinú-San Jacinto. Bogotá d.c.

Aller, l., et all (1985). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. ada. oklahoma: u.s. environmental protection agency, 1985.

Calderón, l. (2017). Estimación y análisis de la evapotranspiración en el municipio Manizales estimation and analysis of evapotranspiration in the municipality of Manizales. Manizales.

Corporación autónoma regional del atlántico – CRA. 2015. expedientes de concesión de agua subterránea. Barranquilla, 2015.

Custodio, e. (2001). Effects of groundwater development on the environment. Bol. geolog. Minero, Madrid, 111(6): 107–120.

Duque-Caro (1979) major structural elements and evolution of northwestern Colombia. AAPG memoir 29, p. 329-351

Duque-Caro, h (1984) Structural style, diapirism, and accretionary episodes of the Sinú - San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland. Geological Society of America, memoir 162, p. 303-316.

Duque & Dueñas (1987). The stratigraphy and diapiric structures of the northwestern colombia, cartagena - carmen de bolivar area. Colombian society of petroleum geologists and geophysicists, 25th annual conference, p, 28,-303

Fernández c, a (2012). El agua: un recurso esencial. Química viva, vol. 11, núm3. pp. 147-170. buenos aires, argentina.

Hydrology National Engineering Handbook (2009). Hydrologic soil groups. United States department of agriculture.cap7. 210–vi.

IDEAM. (2010). Estudio nacional del agua 2010. Bogotá, d. c.: instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales.

IDEAM. (2013). Aguas subterráneas en Colombia: una visión general. bogotá, d. c., 2013. p. 284.

Ingeominas. (1985). Resumen de la hidrogeología de los departamentos de atlántico y bolívar en el norte del canal del dique. Informe 1971.1. Bogotá, Colombia.

Ingeominas. (2003). Atlas de aguas subterráneas de colombia en escala 1:500.000: memoria técnica de la plancha 5-04. bogotá d.c., 81 pp.

Ingeominas. (2004). Programa de exploración de aguas subterráneas. Instituto colombiano de geología y minería (ingeominas). p. 42.

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales – ideam. (2015). Estudio nacional del agua 2014. bogotá d. c., 496 pp.geológico. bogotá. no. 1. p. 172.

Servicios Hidrológicos Integrales (2016). Diagnostico preliminar de los acuíferos del departamento del atlántico en el marco de la elaboración de los planes de manejo de acuíferos. medellín, 2016.

Lavao, S(2014). Aplicación de la teoría del número de curva (cn) a una cuenca de montaña. caso de estudio: cuenca del río murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica bogotá d.c, universidad militar nueva granada.

Margat J. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. Bases de la cartographie. brgm # 68. slg 198 hyd. orléans. schmidt r. 1987. Groundwater contamination susceptibility in Wisconsin. wis. Dpt. of nat. res. groundw. manag. Plan rep. # 5. wr 177-87: 1-27. Madi.

Vargas, Mc (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación; ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, dirección de ecosistemas – grupo de recurso hídrico.

Vélez, M & Vásquez L (2004) Métodos para determinar la recarga de acuíferos. Ed: Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología, Medellín, Colombia.

Vrba, j. y Zaporozec, a. (1994). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Internacional Association of Hydrogeologist/UNESCO. Tomo 16, Verlag Heinz Heise. Alemania.

Younger, p.l. (2007). Groundwater in the environment, an introduction. blackwell publ. oxford: 1–317.